

Conference Paper, Published Version

**Lehmann, Sirko; Lehmann, Boris**

## **Stabilisierung überströmbarer Erddeiche mittels qualifizierter Bodenverbesserung**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104642>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Lehmann, Sirko; Lehmann, Boris (2018): Stabilisierung überströmbarer Erddeiche mittels qualifizierter Bodenverbesserung. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wasserbauwerke im Bestand - Sanierung, Umbau, Ersatzneubau und Rückbau. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 60. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 445-454.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## **Stabilisierung überströmbarer Erddeiche mittels qualifizierter Bodenverbesserung**

Sirko Lehmann  
Boris Lehmann

Im Rahmen einer Promotion an der TU Darmstadt wird untersucht, wie in der geotechnischen Baupraxis übliche Verfahren der qualifizierten Bodenverbesserung (*Paulmann, 1997*) auf den Flussdeichbau übertragen werden können. Mittels qualifizierter Bodenverbesserung wird eine höhere Festigkeit und Tragfähigkeit von Böden erzielt, was unter anderem auch für den Deichbau von Vorteil sein kann. Für den Flussdeichbau im beengten Raum (z.B. urbaner Raum) ist die Anwendung der Bodenverbesserung auf den Deichkörper als eine kostengünstige Alternative zu Spezialtiefbaulösungen denkbar. Zudem bietet sich die Methode bei der Sanierung und Erhöhung bestehender Deichanlagen aufgrund der Platzersparnis an. Daher wurden an der TU Darmstadt physikalische und numerische wasserbauliche Studien zur Stabilität derartig verbesserter Deichkörper durchgeführt und bewertet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind vielversprechend, da alle simulierten Belastungen und Einflüsse schadlos vom verbesserten Deich ausgehalten wurden, obwohl dessen Deichflanken deutlich stärker geneigt waren, als dies im Deichbau bisher üblich ist. Aufgrund der positiven Resistenz des untersuchten Deichmodells wird gegenwärtig die verfahrenstechnische Durchführung der Deichverbesserung untersucht, da die Methoden der qualifizierten Bodenverbesserung die Beimischung und/oder Injektion von Zuschlagstoffen erforderlich macht. Auch hier zeichnet sich bereits jetzt mit Blick auf bereits langjährig praktizierte Verfahren im Verkehrswegebau eine Realisierbarkeit ab, so dass eine praxisgerechte Aufbereitung des Verfahrens für den Flussdeichbau absehbar ist.

Stichworte: Hochwasserschutz, Flussdeich, Qualifizierte Bodenverbesserung, Überströmung, Wasserbauliche Modellversuche, TU Darmstadt

### **1 Forschungsidee und Hintergrund**

Hochwasser ist ein natürlicher Prozess, bei dem die Flüsse mehr Wasser abführen als üblicherweise. Ursache dafür sind hydrologische Ereignisse wie Starkregen und Schneeschmelze in Verbindung mit gesättigten Böden und geringen Versickerungs- und Verdunstungsmengen. Aufgrund der Klimaveränderung kommt es immer häufiger zu sog. Extremereignissen, deren zeitlicher Verlauf

und Intensität zu Hochwasserabflüssen führen, welche nahe den Bemessungsergebnissen von Schutzbauwerken oder gar darüber liegen.

Nach wie vor sind Deichbauwerke die am häufigsten eingesetzten Hochwasserschutzanlagen. Mit der Häufung der Extremereignisse und der weiteren Besiedelung des Deichhinterlandes muss an vielen Stellen eine Ertüchtigung und/oder Erhöhung von vielen Deichen durchgeführt werden, um das Gefährdungsrisiko bei Hochwasser weiterhin gering zu halten. Besonders im urbanen Raum ist dies jedoch nur bedingt möglich: Hier steht die Bebauung in direkter Nachbarschaft zum Deich – eine Deichkronenerhöhung erfordert jedoch bei konventioneller Bauweise eine deutliche Verbreiterung, wozu der Raum oftmals nicht verfügbar ist. Bei solchen Randbedingungen bieten sich daher nur Maßnahmen des Spezialtiefbaus und/oder zusätzliche Hochwasserschutzmaßnahmen an – beispielsweise das Einrammen einer Spundwandschürze oder der Einbau einer Schlitzwand in den bestehenden Deichkörper. Derartige Maßnahmen wirken sich jedoch auf die Durchlässigkeit des Deichkörpers und damit auf die hydraulischen Kräfte als auch auf die Kosten nachteilig aus.

Der vorliegende Beitrag möchte speziell für den Deichbau, die Deichsanierung oder die Deichkronenerhöhung bei beengten räumlichen Verhältnissen eine neue Maßnahmenmöglichkeit vorstellen. Im Zuge einer Promotionsarbeit an der TU Darmstadt wird untersucht, Deiche/Deichabschnitte mittels eingebrachter Bindemittel geotechnisch zu stabilisieren und dadurch die Möglichkeit zu nutzen, den Deich steiler geböschst auszuführen, als dies im konventionellen Deichbau üblich ist. Die Technik der sog. qualifizierten Bodenverbesserung durch Zugabe von Bindemitteln wird im Bereich der Geotechnik (z.B. Bauwerksgründungen), sowie im Verkehrswegebau (z.B. Bahn- und Straßendämme) bereits langjährig und vielseitig erfolgreich eingesetzt (*Paulmann, 1997; RIL 836.0502, 1999*).

Das *DWA-Merkblatt M 507-1* führt zu einer Modifikation von Deichkörpermaterialien aus: „Durch Zugabe von [...] Kalk kann ebenfalls eine ausreichende Festigkeit erreicht werden“ (2011, S. 63). Aufgrund von fehlenden Untersuchungen im Bereich des Wasserbaus (Über- und Durchströmung des verbesserten Materials) mangelt es an klaren Empfehlungen dazu und viele Deiche werden bisher gemäß den konventionellen Vorgaben gebaut. Lediglich bei planmäßigen Überströmstrecken kommt es zur Verwendung des Baustoffgemisches, hier jedoch i.d.R. bewusst mit flachen Böschungsneigungen, um die durch die Überströmung resultierenden Kräfte abzuschwächen (*Westrich et al., 2003*).

In einem vorläufigen Merkblatt des Forschungsinstitutes der Zementindustrie in Düsseldorf (*Dahms et al., 1977*) wurde die Eignung von zementstabilisierten Böden auch für den Deichbau und bereits auch mit dem Hinweis auf die dann gegebene Realisierbarkeit steilerer Böschungen bereits empfohlen. Allerdings ist dieses Merkblatt nicht über den Entwurfsstatus hinaus abgeschlossen und daher nicht publiziert worden.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Deichbau, Deichunterhaltung und Überströmung

Im Flussdeichbau unterscheidet man zwischen zonierten und nicht zonierten Deichen. Letztere sind in der Regel eher Altbestands- und Kleindeiche. Bei Mehrzonendeichen besteht der Querschnitt neben dem Stützkörper zusätzlich aus einer Dichtung und/oder einem Dränfuß. Weiterhin sind meistens Wühltierschutzschichten, sowie Oberbodenschichten aufgebracht.

Die maximal empfohlene Deichböschungsneigung beträgt 1:3 (*DIN 19712, 2013, S. 26; DWA-M 507-1, 2011, S. 20*). Zudem werden häufig land- und wasserseitig Bermen angelegt, auf denen ein Deichverteidigungsweg integriert sein kann. Die Deichkronenhöhe bemisst sich an dem standort- und hochwasserbezogenen Bemessungswasserstand zuzüglich eines Freibords. Detaillierte Angaben und Empfehlungen hierzu, sowie die erforderlichen geotechnischen und hydraulischen Nachweise, sind den gängigen Regelwerken zu entnehmen. Neben der Erfüllung dieser Nachweise sind für einen Deich diverse Unterhaltungsmaßnahmen, wie Pflege der Grasnarbe und Wühltier-/ Schädlingbekämpfung, wichtige Bestandteile zur Gewährleistung der nachhaltigen Funktionstüchtigkeit.

Besonders die Grasnarbe dient nicht nur der optischen Einpassung des Deiches in die Landschaft, sondern der Widerstandsfähigkeit und dem Schutz des Erdbaukörpers an sich. So kann eine gute und intakte Grasnarbe selbst den Belastungen einer Überströmung einige Zeit lang standhalten. Dieser Schutz wird maßgeblich von z.B. der Grabe-Aktivität heimischer Wühltiere (z.B. Nutria und Feldhase) gefährdet. So entstandene Initialschäden bilden häufig Angriffspunkte für eine beginnende Erosion und damit für ein Deichversagen. (*Lehmann, B. et al. 2015; Lehmann, S. 2015*)

### 2.2 Qualifizierte Bodenverbesserung

In der bodenmechanischen Baupraxis kommt es häufig vor, dass ein vor Ort befindlicher natürlicher Baustoff/Baugrund nicht den benötigten Anforderungen

und Stabilitätseigenschaften genügt. Neben Bodenaustausch und Verdichtung hat sich die sog. qualifizierte Bodenverbesserung bewährt. Dabei wird dem Bodenmaterial ein mit Wasser reagierendes Bindemittel (Kalk und/oder Zement) zugefügt, um eine Stabilisierung des Bodengefüges zu erzeugen. Die qualifizierte Bodenverbesserung zeichnet sich im Besonderen dadurch aus, dass sie zusätzlich zur Tragfähigkeit die Frostbeständigkeit sicherstellt (*Floss, 2011: 483*) und zudem eine Permeabilität des Bodengefüges weiterhin gewährleistet.

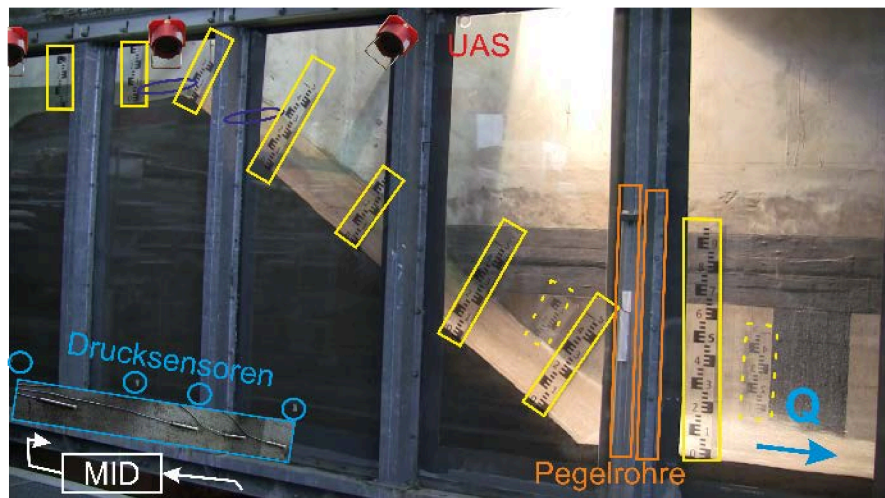
### **3 Erste wasserbauliche Untersuchungen**

#### **3.1 Versuchsaufbau**

Im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt befindet sich die sogenannte „Tiefrinne“. Hierbei handelt es sich um eine 30 m lange, 3 m hohe und 0,75 m breite Versuchsrinne, die in den Hallenboden versenkt und durch Sichtfenster aus einem Beobachtungsraum im Keller auf 7 m Länge eingesehen werden kann. In diesem Gerinne wurde ein zwei Meter hohes Deichmodell aufgebaut, messtechnisch bestückt und mit unterschiedlichen hydraulischen Einwirkungen belastet.

Der Deichkörper wurde homogen aufgebaut und besteht aus einem stark schluffigen Feinsand (si\*FSa). Bereits beim Aufbau des Deiches fand eine qualifizierte Bodenverbesserung statt, welche mit 7 m-% Dorosol C30 (Fa. Holcim, kalk-Zementgemisch: 30% Kalk und 70% Zement) und einem Wassergehalt von 18 % in 15 cm Schichten eingebaut und lageweise verdichtet worden ist.

Die zudem eingebaute Messtechnik zur Erfassung der Krafteinwirkungen, Durchsickerung und Überströmung sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Rinne kann über zwei verschiedene, mit magnetisch induktiven Durchflussmessgeräten (MID) bestückten, Rohrleitungen (DN 200 und DN 700) beaufschlagt werden. Wasserseitig, sowie auf Krone und Deichböschung wurden Ultraschallabstandssensoren (UAS) zur Erfassung von Wassertiefen befestigt. Zusätzlich kann die Wassertiefe entlang der Deichflanke über an den Sichtfenstern angebrachte Messstreifen bestimmt werden. Mittels Mikroflügel kann die Fließgeschwindigkeit auf der Krone erfasst und mittels eines Spitzentasters die Lage der Grenztiefe bestimmt werden. Im Deichauflagerbereich (auf Höhe der landseitigen Berme) wurden zudem vier Drucksensoren installiert. Gleichzeitig ist die Rinnensohle mit vier Pegelrohren ausgestattet.



**Abbildung 1:** Eingebauter Deich in der Tiefrinne mit Positionierung der Messeinrichtungen

### 3.2 Versuchsdurchführung

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde der Deichkörper mit unterschiedlichen spezifischen Abflüssen (von 84 bis 641 l/(s m), Laststufen nach *ASTM D6460-12*) und Belastungsfällen insgesamt mehr als 32 h überströmt. Jeder Lastfall wurde dabei mind. 2 h konstant gehalten.

Tabelle 1 zeigt die einzelnen Lastfälle mit jeweiliger Überströmdauer und -intensität. Die maximale Schubspannung an der Sohle  $\tau_{\max}$  wurde hierbei jeweils am landseitigen Böschungsfuß erfasst. Sie wurde mittels iterativer Spiegellinienberechnung (für eine steile Schussrinne) nach Formel 1 und 2 berechnet.

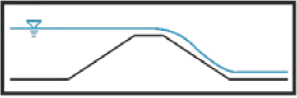
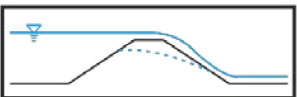
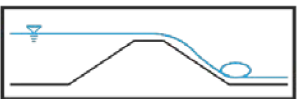
$$\tau_{\max} = \tau_{s, \text{Fuß}} = \tau_0 \frac{\lambda_{\text{Sohle}}}{\lambda} \quad (1)$$

$\tau_0$	Wandschubspannung	[N/m <sup>2</sup> ]	nach Gl. (2) berechnet
$\lambda_{\text{Sohle}}$	Sohlwiderstandsbeiwert	[-]	
$\lambda$	Widerstandsbeiwert	[-]	aus Kalibrierung

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \lambda \cdot \rho \cdot v^2 = \rho \cdot g \cdot r_{\text{hyd}} \cdot I_E \quad (2)$$

$\rho$	Dichte von Wasser	[kg/m <sup>3</sup> ]	
$v$	Fließgeschwindigkeit	[m/s]	am Böschungsfuß
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]	9,81 in Darmstadt
$r_{\text{hyd}}$	hydraulischer Radius	[m]	
$I_E$	Energiegefälle	[-]	Sohlgefälle

**Tabelle 1** Gekürzte Daten der Versuchsdurchläufe

Lastfall	Überströmdauer $t$ [h]	Durchfluss $q$ [l/s m]	Schubspannung $\tau_{\max}$ [N/m <sup>2</sup> ]
	12	84 – 218	120 – 288
	14	152 – 641	168 – 384
	6	283 – 641	240 – 384

Die bisher untersuchten Belastungsszenarien umfassen drei realitätsnahe Zustände für extreme Hochwassersituationen: Eine Überströmung des Deiches mit nicht voll ausgebildeter (instationärer) Sickerlinie, eine Überströmung mit gleichzeitiger voll ausgebildeter Durchsickerung sowie eine Überströmung mit landseitigem Wechelsprung und nicht voll ausgebildeter Sickerlinie.

Die Verdichtung des gebauten Deichkörpers betrug nach Einbau und vor Belastungsbeginn 97% der Proctor-Dichte von 1,798 g/cm<sup>3</sup>. Nach einer Aushärtezeit von 28 Tagen und nach einer Standzeit von einem Jahr wurden Verdichtungskontrollen mittels dynamischen Plattendruckversuchen am Deichmodell durchgeführt. Das dynamische Verformungsmodul ist in diesem Zeitraum sowohl auf der Deichkrone als auch auf dem landseitigen Auslauf/Berme konstant bei über 120 MN/m<sup>2</sup> geblieben, was mit Blick auf die während dieser Zeit ertragenen Belastungen ein sehr gutes Ergebnis ist.

### 3.3 Beobachtungen und Ergebnisse

Der eingebaute Deichkörper blieb bei allen durchgeführten Versuchen mit und ohne Überströmung absolut stabil und es konnten trotz massiver hydraulischer Belastungen nur kleine Schadstellen erwirkt und keine Undichtigkeiten nachgewiesen werden. Trotz der sehr steil ausgeführten Deichböschungen hat der Versuchsdeich alle Stabilitätsnachweise bestens erfüllt und sich im Vergleich zu einem homogenen konventionellen Deich als deutlich stabiler und belastungsfähiger erwiesen.

Während des Einbaus in der relativ schmalen Rinne wurden die schrägen Deichböschungen direkt modelliert - in der realen Baupraxis werden diese zunächst stufenförmig ausgebildet und anschließend abgestochen. Aufgrund dieser



Vorgehensweise sind im Böschungsbereich Tagesstoßfugen und einige kleinere Löcher zur jeweiligen Verankerung einer Arbeitsplattform entstanden. Für die dann anlaufenden Versuche wurden diese Fehlstellen nicht beseitigt, sondern bewusst als Initialschäden/Schwachstellen belassen (bspw. zu sehen in Abbildung 2 rechts oben).

Die Fehlstellen wurden vor und nach jedem Versuch photographisch festgehalten (Abbildung 2) und vermessen. Die fortlaufenden Beobachtungen und Vermessungen haben gezeigt, dass sich die Fugen in ihren Ausmaßen während der Versuche nicht verändert haben. Die Löcher zur einstigen Verankerung der Arbeitsplattform haben teilweise oberflächennah eine geringe Vergrößerung erfahren, ohne jedoch die Standsicherheit des Deiches zu gefährden. Zudem bildete sich am landseitigen Deichböschungsfuß eine Mulde mit zwei bis drei Millimetern Tiefe aus – Ursache dafür waren die letzten Versuchsreihen mit starker Überströmung, bei denen sich am Deichfuß aufgrund des dortigen Gefälleknicks ein Wechselsprung ausgebildet hat. Das ausgetretene Sickerwasser war bei allen Versuchen klar und trug demzufolge kein Bodenmaterial aus.



**Abbildung 2:** Links: Landseitige Böschung vor den Versuchen. Rechts: Landseitige Böschung nach den Versuchen. (Blickwinkel leicht verschoben)



## 4 Weitere Aspekte des qualifiziert verbesserten Deiches

Das qualifiziert verbesserte Bodenmaterial hat nach durchgeführten Triaxial-Versuchen eine hohe Scherfestigkeit ( $\varphi' = 25^\circ$ ;  $c' = 286 \text{ kN/m}^2$ ). Daher eignet es sich erwiesenermaßen für bis zu 1:1,5 geböschte Erddämme. Leider lässt sich die Böschung aufgrund ihrer Steilheit kaum mehr begehen. Dieser Umstand macht eine Instandhaltung einer aufgetragenen Grasnarbe und eine Deichschau schwierig. Zudem würde sich selbst bei einer Begrünung des Deiches ein so steiles Bauwerk nicht natürlich ins Landschaftsbild einpassen.

Für eine Begrünung wird zudem das Aufbringen einer Opferschicht notwendig – Erfahrungen hierzu zeigen auf, dass dies für steile Böschungen möglich ist ( $< 1:2$ ; vgl. *Schiechl*, 2002: 44f). Zur Bewertung der Durchwurzelungsfähigkeit (wodurch eine zusätzliche Opferschicht ggf. entfallen könnte) eines qualifiziert verbesserten Deiches laufen gegenwärtig Anwachsversuche mit verschiedenen aufgetragenen Oberbodenmächtigkeiten und einer Saadmischung der Deichmeisterei Biebesheim an einem separaten Versuchsstand an der TU Darmstadt.

Bei vorangegangenen Untersuchungen (*Lehmann*, S. 2015) hat sich gezeigt, dass gerade Initialschadstellen durch Wühltriebfall große Probleme bei Deichen und deren Standsicherheit sowie der Widerstandsfähigkeit gegenüber Überströmung mit sich bringen. Die hohen Festigkeiten des qualifiziert verbesserten Deichkörpers lassen jedoch darauf schließen, dass die heimischen Wühltiere den Deich nach den ersten Grabe-Versuchen eher meiden werden.

## 5 Fazit und Ausblick

Die bereits vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass kleine, zementstabilisierte einzonige Deiche selbst mit unüblicher steiler Böschung einem Hochwasser tagelang widerstehen und selbst stundenlange Überströmungen schadlos überstehen. Einzonige Deiche sind heutzutage kaum noch anzutreffen, jedoch lassen sich die Versuchsergebnisse auch auf einen mehrzonigen Deich mit qualifiziert verbessertem Stützkörper und Böschungen übertragen.

Um die Stabilität qualifiziert verbesserter Deiche als auch die bauverfahrenstechnische Vorgehensweise bei der Sanierung und/oder dem Neubau solcher Deiche sowie deren Resistenz gegenüber natürlichen Einwirkungen (Wühltiertätigkeit, Wurzelwerk) weiter untersuchen zu können, sind Großversuche an einem realen, kontrolliert hydraulisch beaufschlagbaren Forschungsdeich auf dem Gelände der Deichmeisterei in Biebesheim geplant. Der dort vorhandene Forschungsdeich ist innerhalb eines 3,5 m hohen Spundwandkastens auf einer Län-

ge von bis zu 60 m mit einer Pumpleistung von 4,7 m<sup>3</sup>/s überströmbar. Hierfür ist geplant, einen Teil des dort derzeit vorhandenen konventionellen Deichquerschnitts durch einen qualifiziert verbesserten Querschnitt zu ersetzen und vergleichende Untersuchungen durchzuführen.

Ein weiterer Vorteil des Forschungsfeldes ist die freie Zugänglichkeit und die bereits vorhandene Aktivität von Wühltieren in dem Gebiet (Lehmann, S. 2015). Hierbei kann in situ das Verhalten der Tiere an einem solchen Deichaufbau beobachtet werden. Gleichzeitig geben eine realmaßstäbliche Begrünung und die Unterhaltung des Deiches weitere Hinweise auf die Praktikabilität und Einsetzbarkeit des Baumaterials in der Praxis.

Parallel dazu laufen am vorgestellten Deichausschnittsmodell weitere Einstau- und Überströmversuche. Hierbei wird ein spezielles Augenmerk auf Initialschädigungen (z.B. durch simulierten Wühltierbefall) gelegt.

## 6 Literatur

- Floss, R. (2011): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau: ZTV E-StB; Ausgabe 2009; Kommentar und Leitlinien mit Kompendium Erd- und Felsbau. Kirschbaum, Bonn 2011 (4. Auflage)
- Paulmann, G. (1997): Merkblatt für Bodenverfestigung und Bodenverbesserung mit Bindemitteln. VGSV-Verlag, Köln 1997
- Lehmann, B.; Saenger, N.; Wiesemann, J.-U.; von Harten, M.; Lehmann, S.; Bindernagel, R.. (2015): Durchführung und wissenschaftliche Ergebnisauswertung eines Überströmversuches zur Ermittlung der Erosionsresistenz und Standsicherheit eines mit Gras bewachsenen Deichkörpers. Technische Universität Darmstadt in Kooperation mit der Hochschule Darmstadt, im Auftrag des Regierungspräsidiums Darmstadt, Darmstadt 2015
- Lehmann, S. (2015): Realmaßstäbliche Überströmversuche zur Ermittlung der Deckwerksstabilität eines grasbewachsenen Deichs. Master-Thesis, TUprints.ulb.tu-darmstadt.de Darmstadt (zuletzt geprüft 04.01.2018)
- Schiechtl, H.M.; Stern, R. (2002): Naturnaher Wasserbau – Anleitung für ingenieurbiologische Bauweisen. Ernst & Sohn, Berlin 2002
- Dahms, J.; Beyer, E.; Borowsky, U.; Hallauer, O.; Kramer, J.; Loch, W.; Mittusch, H.; Petersen, K.; Probst, B.; Schubenz, D.; Siebel, O. (1977): Vorläufiges Merkblatt für Bodenverfestigung mit Zement im Wasserbau. Beton 1/78 S. 20 ff. Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1978
- Westrich, B.; Vermeer, P.A.; Siebel, R.; Zwetschper, B. (2003): Neue Naturnahe Bauweisen für Überströmbare Dämme an Dezentralen Hochwasserrückhaltebecken und Erprobung von Erkundungsmethoden zur Beurteilung der Sicherheit von Absperrdämmen. Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS), Baden-Württemberg, Stuttgart 2004

- ASTM D6460-12 (2012): Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Earthen Channels from Stormwater-Included Erosion. West Conshohocken 2012
- DIN 19712 (2013): Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern. Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH, Berlin 2013
- DWA-M 507-1 (2011): Deiche an Fließgewässern – Teil 1: Planung, Bau und Betrieb. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef 2011
- RIL 836.0502 (1999): Erdbauwerke – Erdkörper – Ertüchtigung des Unterbaues/Untergrundes. DB Netz AG – Deutsche Bahn Gruppe, Frankfurt 2000

Autoren:

Sirko Lehmann, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Fachgebiet Wasserbau & Hydraulik  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Technische Universität Darmstadt  
Franziska-Braun-Straße 7  
D-64287 Darmstadt

Tel.: +49 6151 16-21168  
E-Mail: S.Lehmann@wb.tu-darmstadt.de